



De l'intérêt d'une étude sur la vulnérabilité des réseaux routiers et de transport pour la compréhension des vulnérabilités territoriales – Le cas du District Métropolitain de Quito (Équateur)

Florent Demoraes

► **To cite this version:**

Florent Demoraes. De l'intérêt d'une étude sur la vulnérabilité des réseaux routiers et de transport pour la compréhension des vulnérabilités territoriales – Le cas du District Métropolitain de Quito (Équateur). *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2009, 18p. 10.4000/cybergeo.22101 . halshs-00436899

HAL Id: halshs-00436899

<https://shs.hal.science/halshs-00436899>

Submitted on 17 Dec 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

De l'intérêt d'une étude sur la vulnérabilité des réseaux routiers et de transport pour la compréhension des vulnérabilités territoriales – Le cas du District Métropolitain de Quito (Equateur)

Relevancy of road and transportation network vulnerability analysis to assess territorial vulnerability – The case of the Metropolitan District of Quito (Ecuador)

Florent Demoraes

Maître de conférences en géographie - Université Rennes 2

UMR 6590 CNRS ESO (Laboratoire RESO)

Chercheur associé à l'UR 029 « Environnement Urbain » - IRD et au Laboratoire EDYTEM (UMR 5204 CNRS)

Mots-clefs : mobilité quotidienne, transport public, réseau, enjeux, vulnérabilité, accessibilité, risques, Quito

Résumé : cet article présente une réflexion sur l'intérêt de questionner la vulnérabilité des supports physiques et logistiques des mobilités quotidiennes pour comprendre à une échelle supérieure, les vulnérabilités territoriales. Après une définition des concepts mobilisés et une présentation du programme dans lequel cette recherche s'est inscrite, la démarche en quatre étapes est détaillée. La première étape a été d'analyser les déplacements quotidiens de personnes (motifs, volume, origine et destination) et le système de transport (offre et réseaux) dans le District Métropolitain de Quito (DMQ). Ceci nous a permis d'identifier et de localiser, dans une deuxième étape, les infrastructures-clefs, pièces maîtresses des réseaux routier et de transport. La troisième étape a été d'évaluer les vulnérabilités de ces infrastructures-clefs, vulnérabilités qui les prédisposent aux endommagements, aux défaillances. La quatrième étape a été de comprendre les risques encourus par l'ensemble du territoire du DMQ compte tenu de la réduction possible de l'accessibilité de différents espaces attribuable à la perte d'opérationnalité d'infrastructures-clefs. Différents scénarii ont été envisagés mettant en perspective les répercussions spatiales prévisibles à l'échelle du DMQ.

Key-words: daily mobility, public transportation, network, critical infrastructures, vulnerability, accessibility, risk, Quito

Abstract: this paper presents a reflection on how relevant it is to assess the vulnerability of the infrastructures on which people's daily mobility relies in order to understand, at an upper level, the territorial vulnerabilities. Once defined the concepts involved in this analysis and after a brief description of the research framework, the four steps thought process is detailed. The first step was to analyse people's daily mobility (motivation, trips volume, origin and destination) and the transportation system (offer and network) within the Metropolitan District of Quito (MDQ). This allowed pinpointing in a second step, key elements within road and transportation network referred to as critical infrastructures. The third step was to assess the critical infrastructure vulnerabilities which expose them to disturbances or failures. The fourth step was to identify all the areas which are liable to experiment a reduction of their accessibility due to a loss of critical infrastructures serviceability. This allowed assessing finally through scenarios the spatial backlashes which are likely to occur at the MDQ scale.

Vulnérabilité : un concept construit progressivement et qui demeure polysémique

L'usage du concept de vulnérabilité utilisé dans les études de risque remonte à une trentaine d'années tout au plus et s'est surtout généralisé au cours de la dernière décennie. Cette notion a beaucoup évolué et demeure polysémique. Elle n'en reste pas moins une composante essentielle du risque au même titre que les aléas et plus récemment les enjeux.

Contrairement au risque, la vulnérabilité n'est pas une potentialité. Elle est tangible et peut plus ou moins bien se mesurer. R. D'ERCOLE (1998) considère la vulnérabilité comme « l'expression synthétique d'un certain contexte, d'un certain nombre de conditions propices, ces dernières étant susceptibles d'engendrer des dommages et/ou dysfonctionnements majeurs en cas de concrétisation d'un aléa », l'aléa étant quant à lui un phénomène d'origine naturelle ou anthropique dont la survenance est incertaine.

Généralement, les travaux mettent l'accent sur « les points de faiblesses » mais de plus en plus les études intègrent aussi l'autre dimension du risque, c'est-à-dire « les points forts » qui permettent de contrecarrer les premiers. Par exemple, C. LUTOFF (2000) distingue les « facteurs de vulnérabilité aggravants des facteurs de vulnérabilité minorants ». Elle considère un vaste ensemble de paramètres susceptibles d'empêcher en cas de crise sismique le maintien des fonctions vitales (alimentation en énergie, en eau, communication...), tout comme les atouts permettant de pallier leurs dysfonctionnements (constructions parasismiques, actions de protections et de préventions engagées...). La notion de capacité de réponse est également considérée parmi les forces qui contribuent à minimiser les vulnérabilités dans certaines études (D'ERCOLE R., DEMORAES F., 2003) : « Le risque est non seulement la résultante, la conjonction spatiale de dynamiques négatives mais également de dynamiques positives, ces dernières ayant pour effet de le réduire ».

On observe également que la question des échelles est de plus en plus débattue dans les analyses de vulnérabilité. Sur la base d'une synthèse portant sur près de 250 références bibliographiques sur le thème des vulnérabilités, LEONE F. et VINET F. (2006) font ressortir que la vulnérabilité n'a pas le même sens et ne s'évalue pas de la même manière selon que l'on étudie un individu, une famille, une infrastructure, un réseau ou un territoire dans son ensemble. En poussant le raisonnement plus loin, on peut ajouter que les renseignements sur la vulnérabilité d'un élément à une échelle donnée sont très précieux car ils permettent de comprendre la vulnérabilité d'autres éléments du territoire et aussi la vulnérabilité de l'ensemble du territoire, comme nous le démontrons dans le présent article.

Un programme de recherche sur l'analyse des vulnérabilités territoriales, centrée sur les enjeux

La philosophie générale du programme (D'ERCOLE R., METZGER P., 2004) développée à Quito, siège de la capitale de l'Equateur, aborde la problématique de la vulnérabilité territoriale en considérant la conjonction de trois variables :

- la répartition géographique des enjeux sur un territoire,
- la vulnérabilité spatiale (accessibilité + exposition aux aléas) des différents secteurs d'un territoire et,
- la vulnérabilité des enjeux.

Ce programme de recherche sur les vulnérabilités territoriales repose ainsi sur la notion fondamentale d'enjeu. Les enjeux pour un territoire revêtent multiples formes. Les territoires reposent tout d'abord sur des « enjeux communs », nécessaires à leur fonctionnement et développement, tels que les services de santé, l'accès à l'éducation, l'approvisionnement en eau, en denrées alimentaires, en carburant, ou encore la mobilité, etc... Les enjeux renvoient également à des domaines de spécialité caractérisant certains territoires, tels que le tourisme, l'industrie, la viticulture, etc.... On peut également mentionner les enjeux de crise (PC de crise, casernes de pompier...) dont la fonction est primordiale notamment en situation d'urgence. Logiquement, l'altération voire la perte d'un de ces enjeux représente un lourd handicap à l'échelle du territoire. Il est donc indispensable d'identifier ces enjeux et d'en analyser les vulnérabilités afin de mettre en place, au plus faible coût et le plus rapidement possible, des mesures efficaces et ciblées visant à assurer leur sûreté et durabilité.

La réflexion présentée ci-après, conduite dans ce programme, aborde la question de la vulnérabilité territoriale à travers un enjeu particulier qui est la mobilité quotidienne des biens et des personnes.

L'analyse des mobilités quotidiennes : une clef de lecture pour la compréhension des vulnérabilités des territoires

La capacité qu'ont les individus de se déplacer est fondamentale pour tout territoire, tant au niveau de sa structuration, que de sa dynamique et de son évolution. Les mobilités quotidiennes témoignent de l'organisation des sociétés et des pratiques sociales prenant place à différentes échelles. Elles reflètent aussi le déroulement de l'ensemble des activités en œuvre sur un territoire.

S'intéresser à la vulnérabilité d'un des piliers du fonctionnement des territoires permet donc à une échelle supérieure d'évaluer la vulnérabilité de ces mêmes territoires. En effet, des difficultés de circulation ou des problèmes d'accessibilité peuvent avoir des impacts lourds de conséquences dans de nombreux domaines. Il peut s'agir par exemple de perturbations des navettes domicile-travail qui entraînent des désorganisations au sein des entreprises, des manques à gagner, voire même des pertes de compétitivité dans certains domaines économiques (tourisme, industrie...) si le phénomène se prolonge. De même, l'arrêt des communications peut poser le problème de pénuries de certains produits essentiels (alimentaires, médicaments...). Les questions de mobilité et d'accessibilité sont également centrales pour les périodes de crise (évacuation des zones sinistrées, accès des secours...) et de récupération (acheminement de matériels de construction, déblaiement de gravats...).

Ces impératifs de mobilités rendent cruciale l'existence de réseaux de communication performants et fiables à l'échelle des territoires. Cette préoccupation est à l'origine d'un nombre croissant d'études sur la fiabilité et/ou vulnérabilité des réseaux (IIDA Y., 1999 ; APPERT M., CHAPELON L., 2001, 2003; CERTU, 2002; BERDICA K., 2002 ; LLERAS-ECHEVERRI G., SANCHEZ-SILVA M., 2001; TAYLOR M.A.P., D'ESTE G.M., 2003 ; GLEYZE J.-F., 2007). Ces études mettent avant tout l'accent sur les outils et/ou indicateurs permettant de mesurer la vulnérabilité des réseaux de transport, mais ne s'attachent pas directement à évaluer les conséquences d'une réduction de l'intégrité des réseaux sur les territoires, comme nous le proposons dans cet article.

D'autre part, l'on constate que les mobilités sont particulièrement sujettes aux perturbations ; la survenue de phénomènes mêmes mineurs peut entraver sérieusement la circulation,

occasionner rapidement des dysfonctionnements dans les services de transports en commun et très vite désorganiser le transport de marchandises. La mobilité est donc un enjeu en soi pour un territoire, un enjeu fragile auquel les gestionnaires attachent une grande importance, un enjeu qu'il convient de préserver à tout prix et d'adapter en permanence à l'évolution des territoires. Ceci est d'autant plus vrai dans les pays du sud où la croissance démographique entraîne des évolutions à la fois rapides et profondes, notamment dans les territoires urbains.

Le District Métropolitain de Quito : un territoire caractérisé par une croissance urbaine soutenue où les transports en commun assurent l'essentiel des déplacements

Juchée à 2 800 m d'altitude en moyenne, la ville de Quito stricto sensu (carte 1), rassemblait au dernier recensement de 2001 environ 1,5 million d'habitants répartis sur 200 km² alors qu'elle ne comptait en 1868 que 45 000 habitants établis sur 4 km². Le District Métropolitain de Quito –DMQ– (entité politico-administrative municipale englobant la ville, son agglomération et des espaces ruraux périphériques) comptait pour sa part 1,8 million d'habitants sur une superficie de 4 350 km².

En 2002, environ deux millions de déplacements étaient réalisés quotidiennement dans le DMQ en transport en commun, contre 1,3 million en 1990 (Nuñez, 1997). Fait notable, le transport en commun représentait entre 70 et 80 % du total des déplacements motorisés. Ceci étant, cette part est à la baisse dans la mesure où le parc automobile a pratiquement doublé au cours des dix dernières années, atteignant en 2002 environ 200 000 véhicules, soit 42 % du parc national alors que le DMQ ne concentre que 15 % de la population équatorienne (12 millions d'habitants).

Compte tenu du fort étalement urbain et de l'accroissement massif de la mobilité, le DMQ enregistre de nombreuses difficultés quotidiennes de circulation et de mobilité (congestion, problème d'accessibilité, problème de transport...) d'autant que la situation socio-économique et politique mouvementée et instable de l'Équateur n'a pas toujours permis à la municipalité de Quito de disposer de moyens financiers et techniques suffisants pour relever le défi.

Le District Métropolitain de Quito : un territoire théâtre de fréquents mouvements sociaux et exposé à de multiples aléas à l'origine de perturbations des mobilités

Le DMQ est également concerné par des problèmes occasionnels affectant notamment les mobilités quotidiennes à cause de mouvements sociaux et de l'occurrence d'aléas d'origine naturelle particulièrement nombreux.

Par exemple, en 1999, une série de grèves générales ayant paralysé le pays pendant plusieurs semaines et perturbé durement les mobilités dans les villes, se sont produites pour protester contre la fermeture des établissements bancaires¹ et contre l'augmentation du prix des combustibles. Plus récemment, en avril 2005, une série de manifestations ayant abouti à la destitution du président, accusé de corruption et d'abus de pouvoir, avait entraîné un blocage de la capitale pendant plusieurs jours.

Non moins fréquents, les aléas d'origine naturelle contribuent également à entraver les communications et déplacements. Certains aléas surviennent de manière relativement

¹ Cette fermeture a privé les citoyens de leurs épargnes et les entreprises de toutes transactions financières.

localisée (inondations, coulées boueuses, glissements de terrain, affaissements des sols) et s'expliquent par les caractéristiques du site d'implantation de la ville (topographie accidentée, forte pentes²) où l'expression de la morphogénèse est très prégnante³ et souvent accentuée par les modalités d'occupation du sol.

D'autres aléas sont également susceptibles d'affecter des espaces beaucoup plus vastes (éruptions volcaniques, séismes). Plusieurs explosions du volcan *Guagua Pichincha* ont eu lieu en octobre 1999 au cours desquelles des cendres se sont déposées sur la ville, heureusement en quantité réduite (quelques millimètres). Plus récemment, en novembre 2002, l'éruption du volcan *El Reventador* (situé à 90 km. à l'est du DMQ) a provoqué à son tour un dépôt de cendres sur l'agglomération qui a engendré de lourdes pertes économiques et des perturbations notoires de la mobilité. De leur côté, les volcans *Cotopaxi* et *Cayambe*, (situés respectivement à 50 km. au sud et à 60 km. au nord-est du DMQ), tous deux recouverts d'une calotte glaciaire, représentent des menaces préoccupantes car leur entrée en éruption pourrait engendrer des lahars⁴ extrêmement dangereux.

De plus, Quito se trouve dans une zone sismique très active. De nombreuses secousses ont affecté la capitale équatorienne au cours des derniers siècles occasionnant de sérieux dégâts (1587, 1755, 1797, 1868, 1949 et 1987).

Si l'on compare la situation de Quito à celle d'autres capitales latino-américaines, telles que Mexico, Lima, Buenos Aires, l'on s'aperçoit que les problèmes pour ces dernières relèvent plutôt de leur gigantisme (pollution, embouteillage) et la variété des aléas naturels y est globalement moindre (avec essentiellement l'aléa sismique pour les deux premières, et des inondations pour la dernière). Parmi les capitales andines, celle qui ressemble peut-être le plus à Quito au regard de sa taille, de son site, et de son exposition aux phénomènes d'origine naturelle, est l'agglomération de La Paz (aléa sismique, glissement de terrain, coulée boueuse, affaissement des sols).

Pour comprendre les problèmes de mobilité susceptibles d'être engendrés en partie par les différents types d'aléas à Quito, nous nous sommes intéressés à évaluer les vulnérabilités des infrastructures physiques sur lesquelles reposent les mobilités. A ce titre, il a été nécessaire de mettre au point une méthode d'analyse particulière. Quelles sont les grandes étapes de cette analyse ? Quels enseignements peut-on tirer de l'analyse de la vulnérabilité des réseaux routier et de transport pour la compréhension de la vulnérabilité d'un territoire ?

Une recherche en quatre étapes partant de l'analyse des mobilités

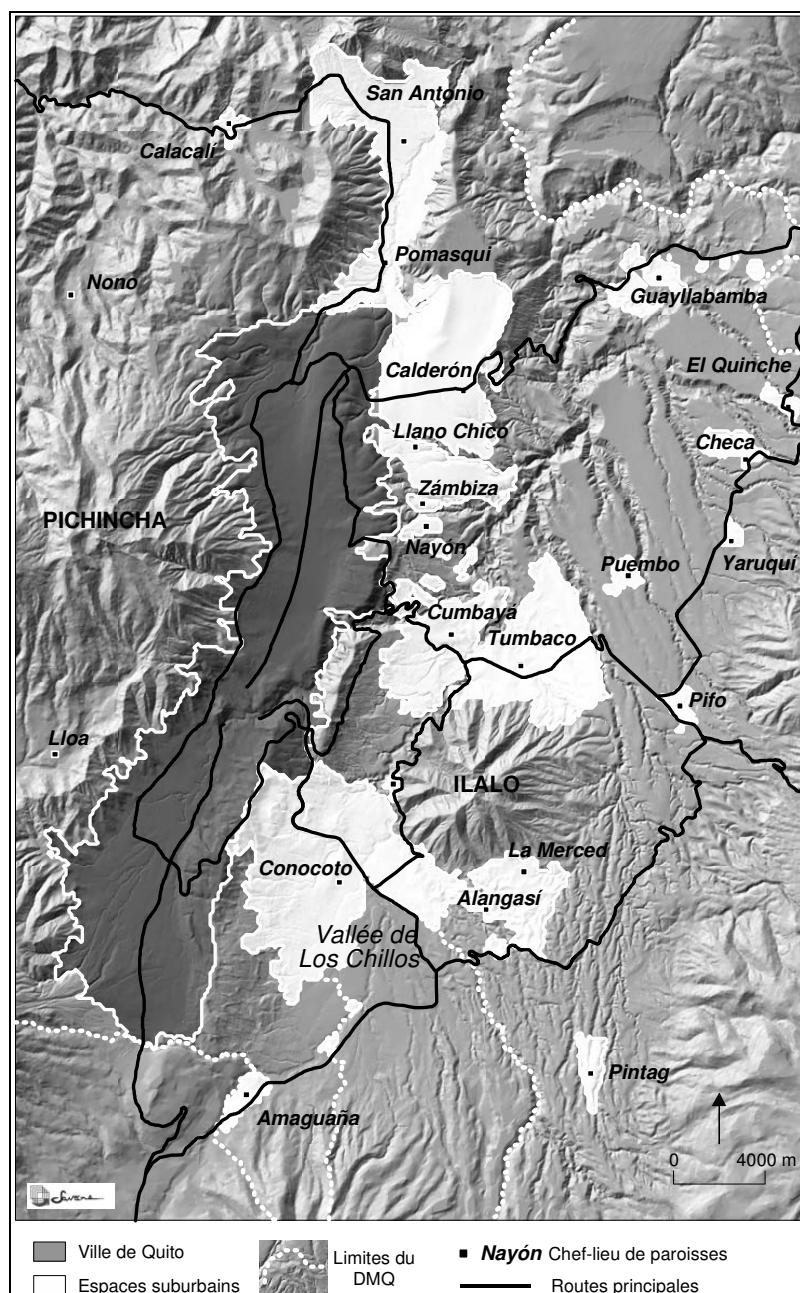
La première étape a été d'analyser les déplacements quotidiens de personnes (motifs, volume, origine et destination) et le système de transport (offre et réseaux) dans le DMQ. Ceci nous a permis d'identifier et de localiser, dans une deuxième étape, les infrastructures-clefs, pièces maîtresses des réseaux routier et de transport. La troisième étape a été de rechercher les vulnérabilités de ces infrastructures-clefs, vulnérabilités qui les prédisposent aux endommagements, aux défaillances. La quatrième étape a été de comprendre les risques

² Les pentes supérieures à 30% occupent 20% du DMQ.

³ A titre d'exemple, 15% de la superficie de la ville stricto sensu est exposée à des inondations et/ou des coulées boueuses (d'après Peltre, 1989) et 30% des sols en ville sont considérés comme étant liquéfiables en cas de séisme (EPN *et al.*, 1995).

⁴ Lahar est un terme indonésien générique décrivant un écoulement rapide saturé en débris rocheux et en eau attribuable à la fonte d'un glacier recouvrant un volcan.

encourus par l'ensemble du territoire étudié compte tenu de la réduction possible de l'accessibilité de différents espaces attribuable à la perte d'opérationnalité d'infrastructures-clefs. Différents scénarii ont été envisagés mettant en perspective les répercussions spatiales prévisibles à l'échelle du territoire.



Carte 1. Agglomération de Quito (repères toponymiques et relief).
Sources : MDMQ /IGM. Réalisation : F. Demoraes

L'ensemble de la méthode, conçue de façon à être reproductible, est divisé en quatre grandes étapes (figure 1). Cette analyse s'est appuyée sur l'exploitation d'une base de données urbaines géo-référencées, créée dès la fin des années 80 au Service Municipal d'Etudes Métropolitaines⁵ en collaboration avec l'ORSTOM (actuel IRD)⁶. Cette base, administrée

⁵ Unidad de Estudios e Información Metropolitana.

⁶ Cette base a permis entre autre la publication de l'Atlas Infographique de Quito (IGM *et al.*, 1992).

avec l'aide du SIG *SavGIS*⁷, a été enrichie dans le cadre de nos recherches dans de nombreux domaines (économie, transport, etc...), dans l'optique de la convertir en un outil d'aide à la décision en matière de planification préventive et de gestion des crises.

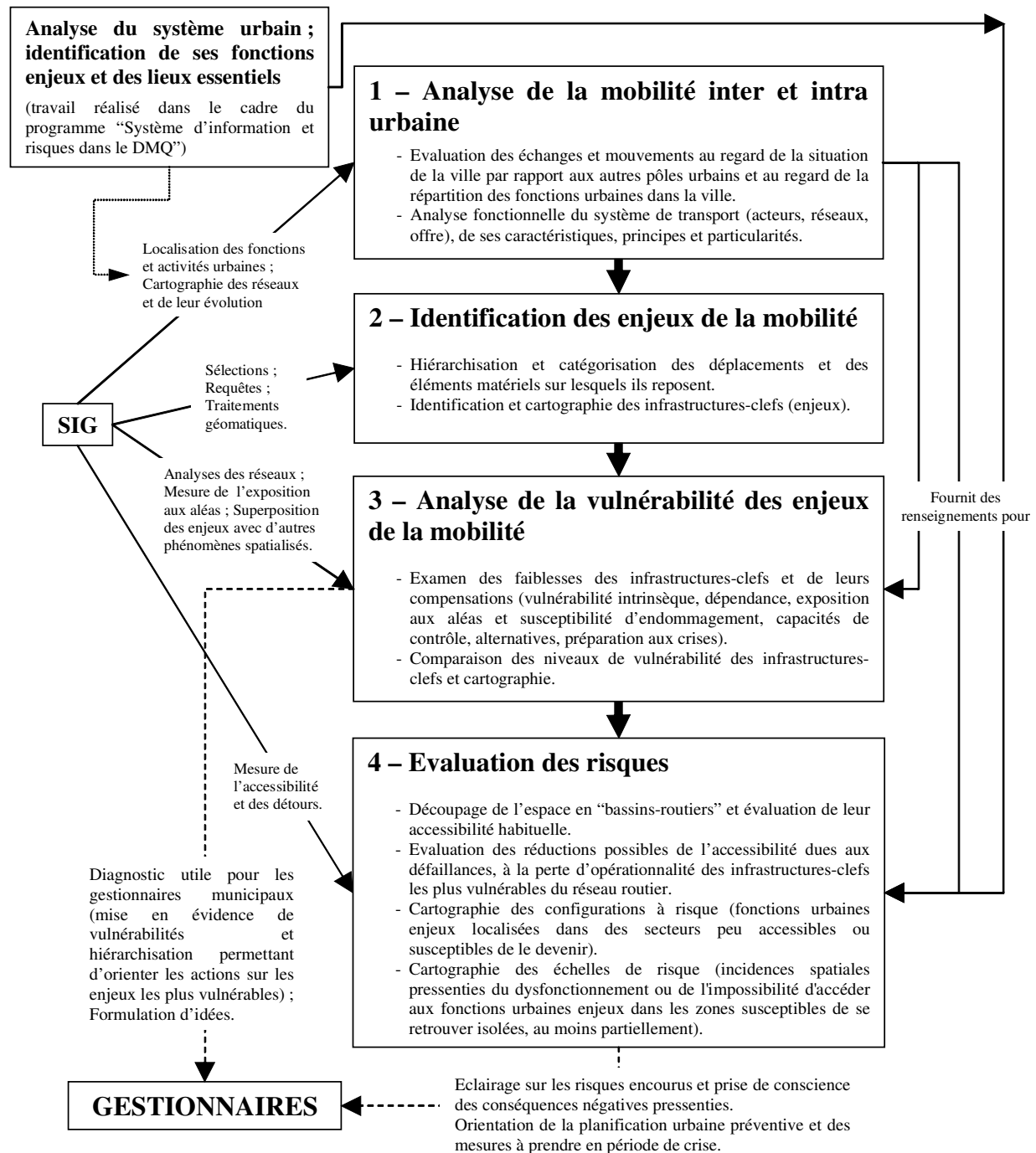


Figure 1. Synthèse de la méthode d'analyse de vulnérabilité partant de l'identification des infrastructures-clefs des réseaux routier et de transport dans le District Métropolitain de Quito - Equateur

⁷ Développé par Marc Souris, ce gratuiciel est téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.savgis.org>

Principaux résultats

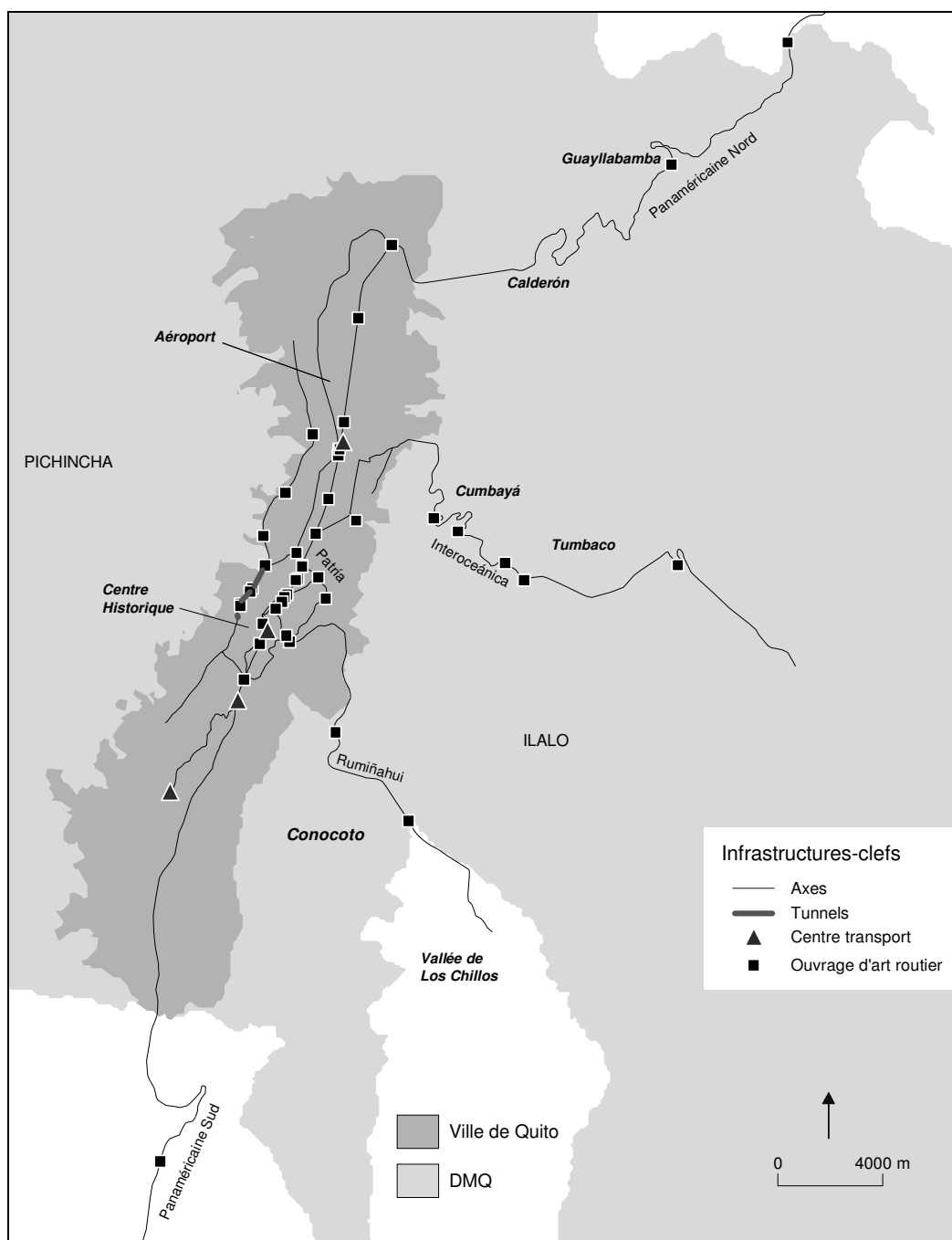
Identification des infrastructures-clefs, supports de la mobilité à l'échelle du DMQ

A partir d'analyses fonctionnelles de la ville et du système de mobilité, les éléments matériels (infrastructures routières et équipements de transport) assurant un rôle de première importance pour les déplacements de personnes à l'échelle du district, ont été identifiés et cartographiés selon une méthode expérimentale développée dans le cadre de notre recherche. La méthode repose sur une hiérarchisation et une classification des infrastructures et considère des critères à la fois quantitatifs et qualitatifs (volume et type de déplacements, fréquentation, utilité et importance dans le réseau, dimension des ouvrages, redondance des infrastructures...).

Pour identifier les infrastructures-clefs, plusieurs paramètres doivent être pris en compte. Par exemple, pour déterminer si un pont est essentiel pour un territoire, on ne peut pas se contenter de considérer uniquement des variables quantitatives comme les dimensions de l'infrastructure (longueur, largeur). A elles seules, elles ne suffisent pas à juger s'il s'agit d'un ouvrage stratégique ou non. Il faut nécessairement avoir recours à d'autres variables (flux, transport). On pourra ainsi déterminer « l'éligibilité » de l'ouvrage à la catégorie « infrastructure-clef », s'il supporte par exemple un grand nombre de déplacements, qui matérialisent l'importance de l'axe à une échelle donnée, ou s'il est unique, c'est-à-dire s'il n'existe pas d'autres ponts proches permettant la jonction qu'il assure entre les deux secteurs. De plus, une telle approche permet de pallier certaines lacunes dans les données. Par exemple, pour déterminer si un axe est une pièce maîtresse dans le réseau, alors qu'on ne dispose pas de comptages de véhicules, on peut regarder si l'axe fait partie du réseau structurant ou s'il occupe une place centrale dans les réseaux de transport à différentes échelles (urbaine, régionale, nationale). De même, l'évaluation du degré d'interdépendance entre secteurs (à partir de variables socio-économiques) permet de faire ressortir des liens importants (observables par exemple à travers les mouvements pendulaires) et de repérer les infrastructures associées (route, voie ferrée, etc.).

L'ensemble de la méthode (variables, critères et seuils choisis) qui ne saurait être décrite ici en quelques lignes, est présentée dans F. DEMORAES (2004) (pp.137-176).

Dans la catégorie des axes-clefs à l'échelle de l'agglomération, ont été retenus (carte 2) : deux des quatre accès au DMQ (Panaméricaines Sud et Nord), trois des quatre axes centre-périphérie (la route qui mène à *Calderón*, la route qui conduit à *Tumbaco*, l'autoroute qui permet d'accéder à la vallée de *Los Chillos*). En ville, ont été retenus les principaux boulevards nord-sud ; Certaines artères est-ouest font également partie des axes-clefs. Les trois tunnels et 43 ponts situés sur les axes-clefs sont aussi des pièces maîtresses pour les communications. Enfin, sept nœuds des réseaux de transports en commun ont été également identifiés comme enjeux. En dehors des axes, la plupart des éléments-clefs de la mobilité est concentrée dans l'espace central et plus particulièrement en périphérie du centre historique.



Carte 2. Infrastructures-clefs des réseaux routier et de transport à l'échelle du DMQ.
Sources : Mairie de Quito et relevés de terrain - Réalisation : F. Demoraes

Vulnérabilité des éléments-clefs des réseaux routier et de transport

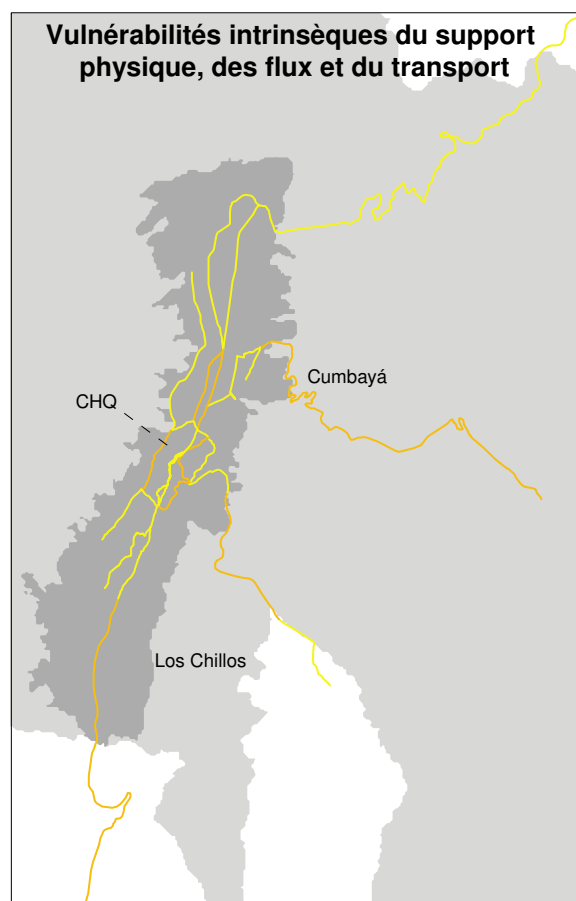
Pour tenir compte de sa complexité, la vulnérabilité des éléments-clefs des réseaux routier et de transport a été analysée selon six entrées (vulnérabilité intrinsèque, dépendance, exposition aux aléas, alternatives, capacité de contrôle, préparation aux crises). Cette méthode⁸ prend en considération les facteurs qui accentuent et ceux qui contrebalancent la vulnérabilité.

⁸ Méthode développée dans le cadre du programme général, et appliquée à d'autres domaines (économie, population, réseaux électrique et d'adduction d'eau potable...).

Chacune des six entrées repose sur l'analyse de différents indicateurs auxquels sont affectés des scores qui sont additionnés et qui permettent d'évaluer le degré moyen de fragilité des infrastructures essentielles. Les six entrées sont décrites ci-après :

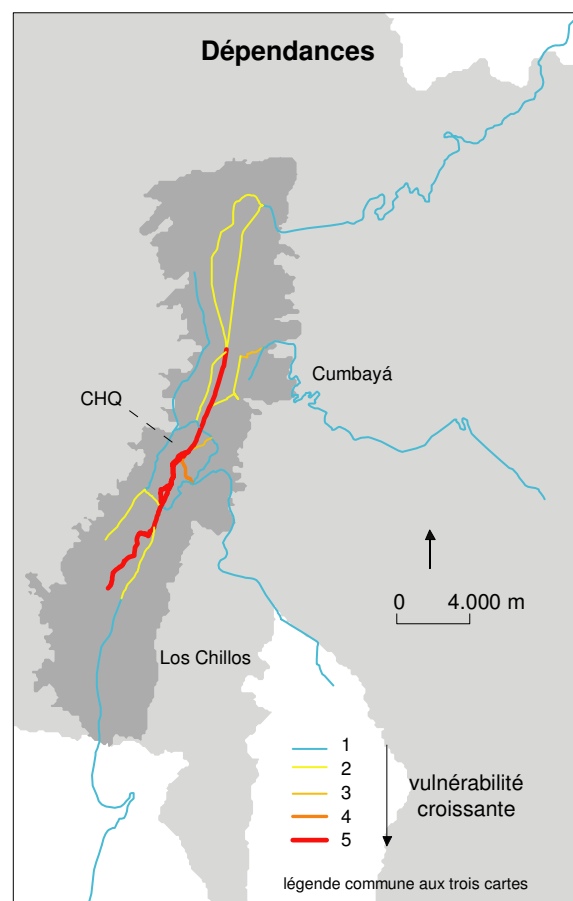
- la vulnérabilité intrinsèque : cette entrée englobe l'analyse des faiblesses internes, les fragilités propres, les faiblesses structurelles et structurales de l'élément étudié (par exemple, la sinuosité d'une route, sa pente, l'état d'une infrastructure...).
- la dépendance : à travers cette entrée, sont analysées les relations de dépendance d'un élément d'un réseau vis-à-vis d'autres systèmes, relations qui sont nécessaires à son fonctionnement (par exemple, l'électricité pour un réseau ferroviaire ou pour le fonctionnement des systèmes de ventilation et d'éclairage dans les tunnels...).
- l'exposition aux aléas et les pertes possibles d'opérationnalité : sont considérés avec cette entrée, les différents types d'aléas d'origine naturelle et anthropique auxquels sont exposés les axes de communication et les dommages ou dysfonctionnements associés prévisibles.
- la capacité de contrôle : dans cette entrée, on se pose la question de savoir s'il est facile ou non d'intervenir au niveau d'une infrastructure ou d'une partie d'un réseau, directement ou à distance, en cas de problème (par exemple, l'existence de systèmes vidéo pour la surveillance routière, la proximité de centres techniques rapidement mobilisables, le degré d'accessibilité d'un équipement, le niveau de sécurisation d'un axe...).
- les alternatives : il s'agit dans cette section de réfléchir sur les possibilités de remplacement, de substitution d'un élément (pont, gare, tunnel...) remplissant une fonction donnée, en cas de défaillance (existence d'itinéraires bis, de voies de délestage, de générateurs pour pallier les coupures électriques...).
- la préparation aux crises : correspond aux mesures préventives, aux diverses formes de préparation, à l'existence de plans prévus par les gestionnaires pour faire face aux perturbations dans les transports.

Cette analyse se base à la fois sur de nombreux traitements SIG (superposition de couches aléas et enjeux, calcul de la pente et de la sinuosité des axes-clefs...), sur des travaux annexes (rapports, enquêtes) et sur les informations fournies par les techniciens et gestionnaires chargés des transports. Les termes employés sont donc les leurs et concernent des infrastructures sur lesquels ils ont directement prise. L'analyse est en ce sens plus facilement appropriée par les intéressés (en tout cas beaucoup plus qu'une étude portant sur la simple exposition de la ville à des aléas).



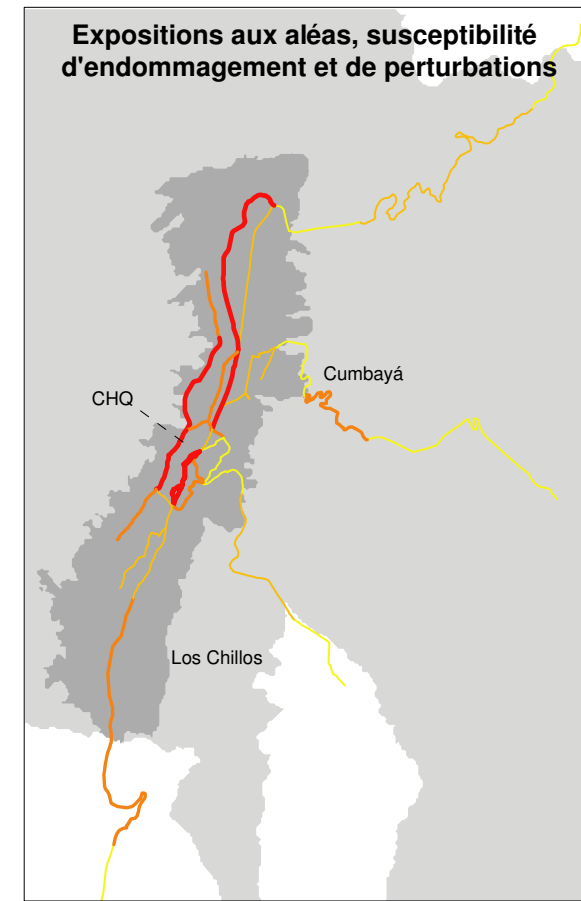
Pris en compte de :

Etat du revêtement, opérationnalité, nombre de systèmes de feux tricolores, pente maximale, sinuosité, remblai, présence de viaduc, ponts ou tunnels, embouteillages quotidiens, degré de pollution lié aux TC, niveau d'accidentalité, perturbations épisodiques, fragilités des TC, dangers lié aux transports de combustibles.



Pris en compte de :

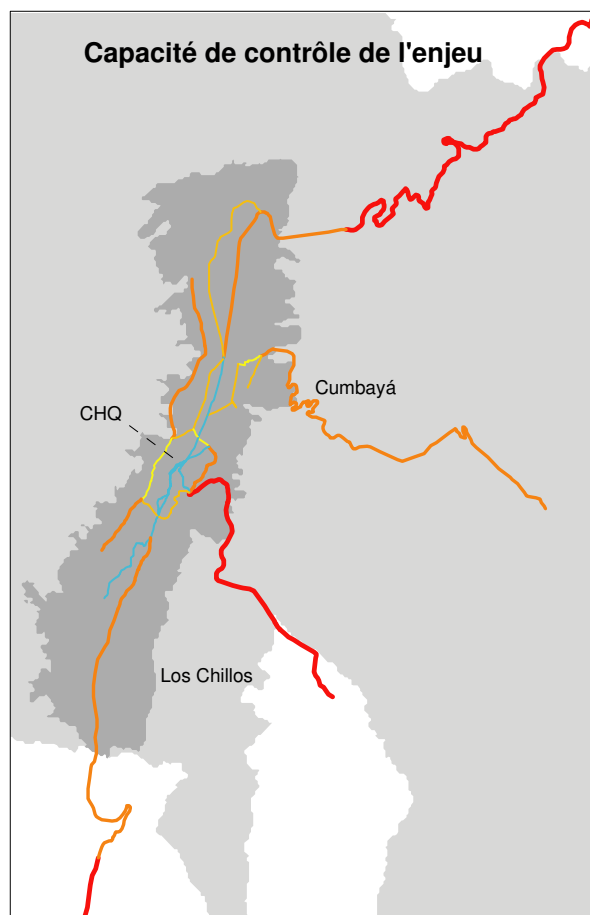
Electricité (feux tricolores + caténaires), bitume (entretien), moyen de communication (radio).



Pris en compte de :

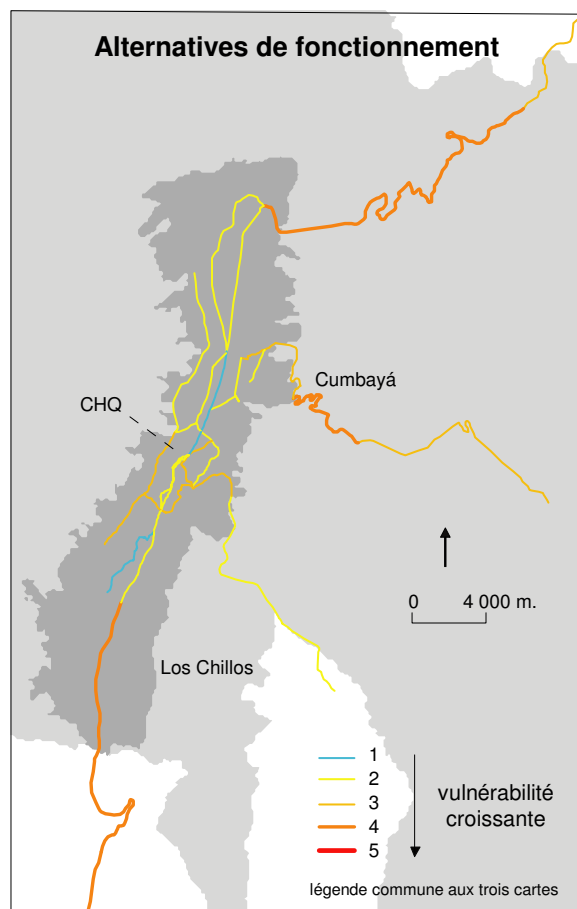
Coulées boueuses, inondations, instabilité des terrains, aléas sismiques, chutes de cendres volcaniques, lahars, coulées pyroclastiques, explosions de produits inflammables.

Carte 3. *Formes de vulnérabilité des axes-clefs du réseau routier dans le DMQ.
Sources multiples (cf. texte). Réalisation : F. Demoraes*



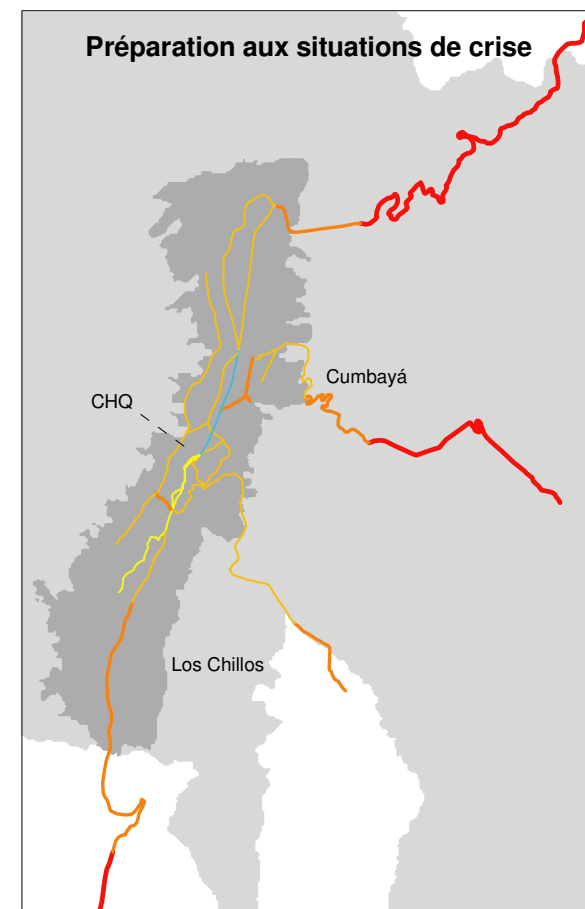
Pris en compte de :

Personnel affecté à la gestion du trafic et/ou du TC, moyen de communication, télécontrôle de la signalisation, contrôle par caméra, concession routière, facilité d'accès.



Pris en compte de :

Alternative routière, adaptabilité des services de transport, alternative énergétique.



Pris en compte de :

Capacité d'intervention en temps normal, préparation aux crises en général, préparation à des phénomènes spécifiques.

Carte 4. *Formes de compensation de la vulnérabilité des axes-clefs du réseau routier dans le DMQ.*
Sources multiples (cf. texte). Réalisation : F. Demoraes.

L'examen de ces six entrées présente l'avantage de considérer les faiblesses mais aussi les forces des éléments-clefs. Par exemple, une section d'un réseau peut être fréquemment hors service (à cause de glissements de terrain, d'accidents, de grèves....), ce qui constitue une faiblesse, mais la circulation peut ne pas en être trop affectée s'il existe à proximité une déviation ou des équipes d'intervention rapide (facteurs de compensation permettant de contrebalancer la faiblesse). La méthode proposée va donc bien au-delà de la simple évaluation de l'exposition des réseaux aux aléas ; elle permet d'apprécier la résilience des réseaux, entendue comme leur capacité à se rétablir rapidement à la suite d'une perturbation. Les cartes 3 et 4 présentent à titre d'exemple, les six formes de vulnérabilité des axes-clefs du réseau routier métropolitain ainsi que la liste des indicateurs retenus dans chacune des formes.

La lecture croisée des différentes formes de vulnérabilités a permis par la suite de mettre en exergue les éléments-clefs qui sont globalement les plus vulnérables (ceci est le cas lorsque les vulnérabilités sont fortes et faiblement compensées), c'est-à-dire ceux qui sont les plus susceptibles de ne plus fonctionner ou de ne plus assurer leur rôle et d'entraîner de graves perturbations des mobilités. C'est donc sur cet ensemble d'éléments-clefs particulièrement vulnérables que des actions locales de réduction de vulnérabilité sont à envisager en priorité.

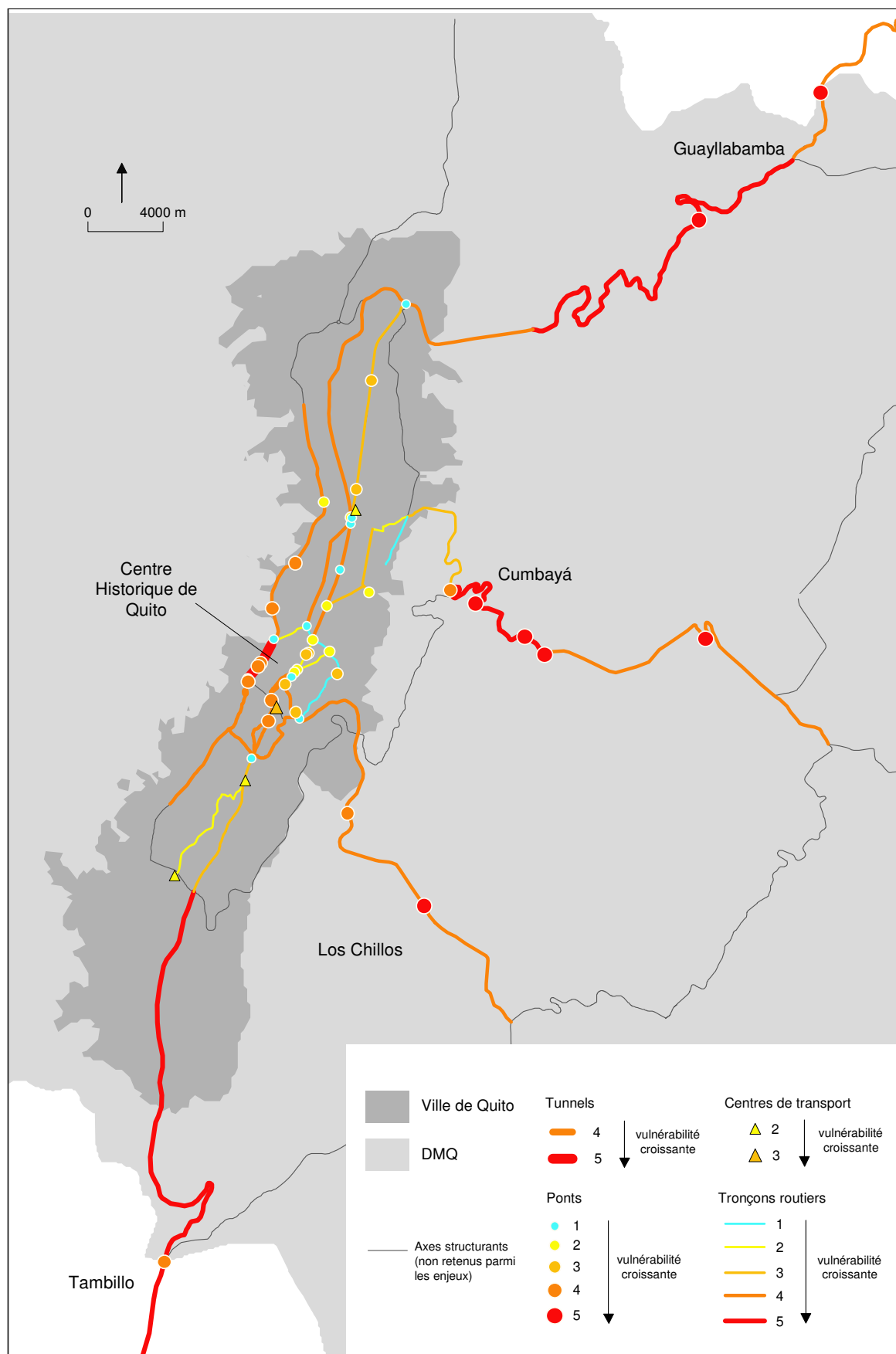
Le cumul des six formes de vulnérabilité a été cartographié (carte 5). Il ressort de cette analyse que comparativement aux autres éléments-clefs, les grands centres de transport figurent comme étant les moins vulnérables puisqu'ils n'atteignent pas de vulnérabilité cumulée « forte » ou « très forte ». En revanche, parmi les éléments-clefs de l'appareil circulatoire (axes, ponts, tunnels), les niveaux « fort » et « très fort » de vulnérabilité cumulée sont atteints par la plupart des voies d'accès à la ville et par les tunnels.

De la vulnérabilité des infrastructures-clefs à la vulnérabilité de l'accessibilité des lieux

Dans le District Métropolitain de Quito, l'accessibilité⁹, entendue comme le degré de facilité avec lequel on atteint un lieu, est très hétérogène et limitée dans certains secteurs, ce qui pose déjà des difficultés au quotidien. Ceci dit, c'est surtout la réduction de l'accessibilité des lieux à cause de la défaillance des infrastructures-clefs des réseaux routier et de transport, qui laisse présager de graves problèmes compte tenu de l'isolement prévisible de certaines zones ou de l'ampleur des détours à effectuer pour y accéder. La réduction possible de l'accessibilité d'une zone a ainsi été évaluée en considérant la vulnérabilité des accès immédiats à la zone (depuis l'extérieur proche). Pour ce faire, nous avons considéré les deux critères suivants :

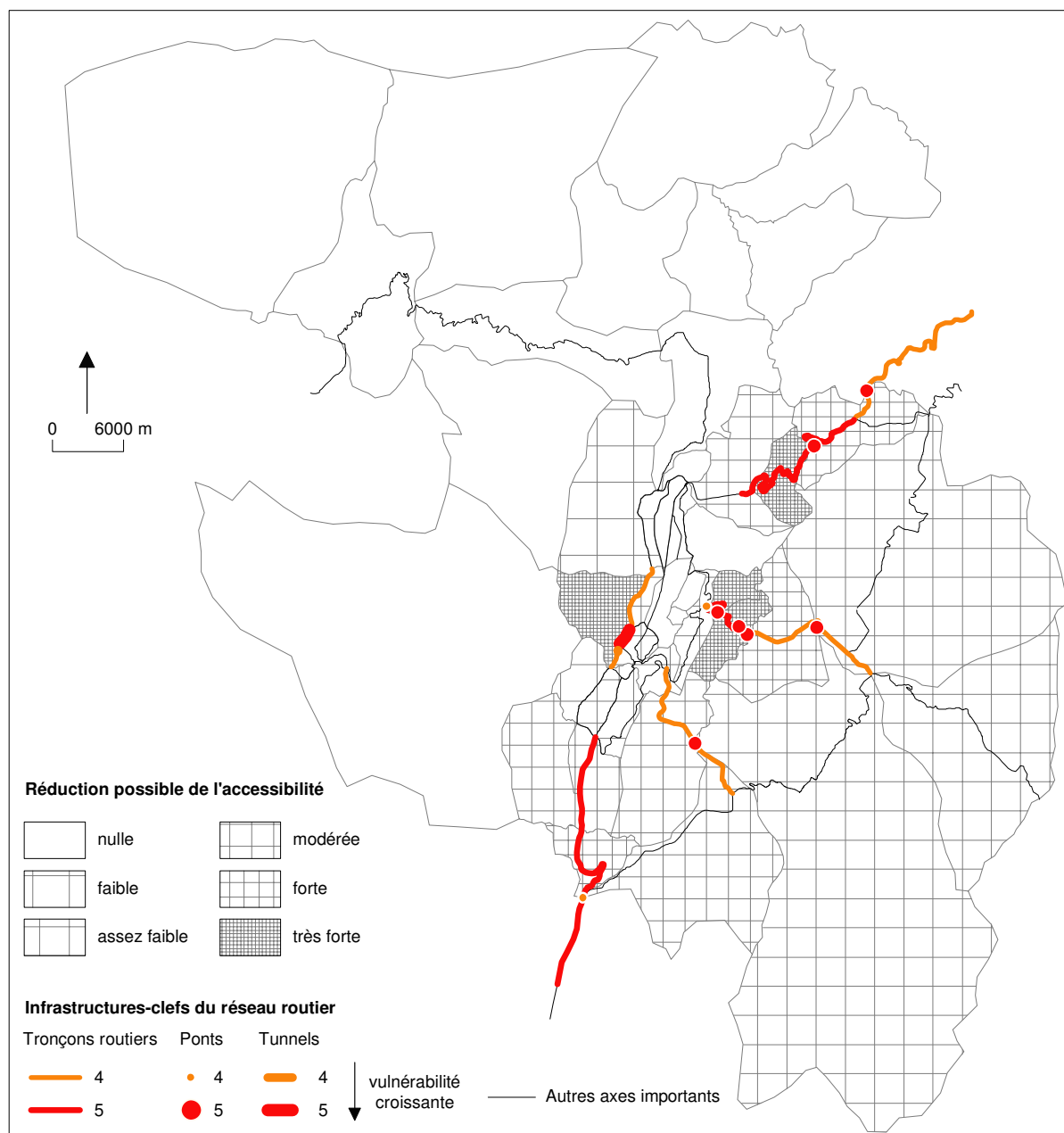
- le nombre d'accès principaux susceptibles d'être neutralisé par rapport au nombre total d'accès principaux
- le nombre d'accès secondaires susceptibles de rester ouvert à la circulation.

⁹ L'accessibilité des lieux présentée ici a été évaluée uniquement au regard du nombre de voies permettant d'atteindre un lieu. Dans une analyse de risque, cette information est d'une extrême importance car elle permet de détecter les lieux difficilement joignables ou susceptibles de se retrouver isolés. Dans F. DEMORAES (2004), cette première approche a été complétée par un deuxième calcul d'accessibilité (non développé ici) reposant cette fois sur le critère de distance kilométrique (écart entre la distance à parcourir en temps normal pour atteindre un lieu et la distance à parcourir lorsque l'intégrité du réseau est altérée). En revanche, les critères temporels et de coût n'ont pu être considérés faute de données.



Carte 5. Vulnérabilité cumulée des éléments-clefs des réseaux routier et de transport.
Sources multiples (cf. texte). Réalisation : F. Demoraes

Cette approche permet de mettre en exergue les possibilités d'isolement au moins partiel de certains secteurs vis-à-vis des secteurs limitrophes. Les possibilités de réduction de l'accessibilité des zones sont d'autant plus fortes que le nombre d'accès est restreint et que ces derniers sont vulnérables. Les niveaux de réduction possible d'accessibilité des différentes zones du DMQ ont ainsi été évalués et cartographiés (carte 6).



Carte 6. Niveau de réduction possible de l'accessibilité des zones au sein du DMQ en cas de perte d'opérationnalité des éléments-clefs les plus vulnérables du réseau routier.

Réalisation : F. Demoraes

De la vulnérabilité de l'accessibilité des lieux à la vulnérabilité du territoire : un éclairage sur les risques encourus

Connaissant les six secteurs dont l'accessibilité est la plus susceptible d'être compromise (catégories forte et très forte sur la carte 6), la dernière étape a été de réfléchir sur les vulnérabilités qui en découlent pour le DMQ dans son ensemble. En d'autres termes, qu'est-ce que l'isolement (tout au moins partiel) de ces six secteurs impliquerait pour le fonctionnement du district ? Pour répondre à cette question, nous avons considéré la répartition spatiale des fonctions urbaines essentielles pour le fonctionnement et pour la gestion de crise à l'échelle du DMQ, ces dernières ayant été identifiées par les autres membres de l'équipe de recherche. En particulier, nous avons cherché à savoir si certaines d'entre elles sont situées dans les six secteurs précédents. La carte 7 est issue de cette confrontation et constitue une base de réflexion pour l'évaluation des risques associés. Plusieurs scénarii ont été envisagés. Nous présentons ici les risques prévisibles associés à l'impossibilité simultanée d'accéder aux six secteurs. Ce cas de figure relève d'une situation exceptionnelle, qui ne s'est encore heureusement jamais produite, mais qui n'est pas dénuée de tout sens dans la mesure où certains phénomènes (séisme, lahars) pourraient entraîner des dommages sur une très vaste partie de l'agglomération.

L'impossibilité d'accéder à certains secteurs laisse entrevoir toute une série de dysfonctionnements. Par exemple, si l'on considère les points de vente d'aliments, organisés en flux tendus notamment pour les denrées périssables, une réduction de leur accessibilité entraînerait très vite des problèmes d'approvisionnement. Ce risque est réel à Quito, car cinq centres principaux de distribution, dont le marché de gros *San Roque*, se trouvent dans les six secteurs dont l'accessibilité est la plus compromise.

Par ailleurs, les ruptures d'accessibilité pourraient affecter durement l'économie du district compte tenu des problèmes auxquels seraient confrontées les entreprises, en particulier celles dont le domaine d'activité contribue au développement du district (commerce, construction, services aux entreprises, floriculture, industries...) ¹⁰. D'une manière générale, pour une entreprise, le fait de voir son accessibilité remise en cause lui porte préjudice. En effet, ses employés pourraient éprouver des difficultés à venir travailler, les matières premières pourraient ne plus être livrées et les productions ne plus être expédiées. Les risques induits sont donc des pertes d'emplois, des manques à gagner, voire une perte de compétitivité. À l'issue de l'analyse, l'on observe que de nombreuses entreprises regroupant près de 5000 emplois sont recensées dans les six secteurs.

En fonction du scénario considéré (séisme, chute de cendre, lahar), ce n'est pas seulement l'accessibilité des installations urbaines stratégiques qui pourrait être remise en cause. Certains phénomènes pourraient également engendrer des dommages aux installations urbaines. Dans ce cas, leur accès serait d'autant plus crucial qu'il faudrait procéder à des réparations afin de réamorcer des systèmes ou maintenir des services. Deux grandes installations du système électrique et un grand nombre d'antennes de télécommunication se trouvent dans les six zones les plus exposées à l'isolement (carte 7). Cette situation peut poser des problèmes si des interventions sur les antennes s'avèrent nécessaires pour remédier à des pannes. Le cas des antennes est d'autant plus préoccupant que les installations appartiennent à des gestionnaires de crise (sécurité civile, pompiers) et à certains organismes assurant des services primordiaux tels que l'Entreprise Electrique de Quito (EEQ) et l'Unité du Trolleybus

¹⁰ Cette définition est celle fournie par nos partenaires économistes municipaux.

(UOST). L'endommagement des antennes, difficilement réparable compte tenu de leur faible accessibilité, pourrait entraîner des dysfonctionnements significatifs dans le système de télécommunications. Ceci pourrait entraîner de graves conséquences pour l'organisation des secours, mais aussi pour le maintien de certains services. De son côté, l'entreprise d'électricité avec deux antennes dans le secteur F1 (secteur susceptible de connaître une très forte réduction de son accessibilité, voir carte 7), pourrait éprouver des difficultés à coordonner les interventions de ses équipes de techniciens sur le terrain. Quant à l'UOST, elle pourrait également rencontrer des problèmes pour maintenir le service du trolley fonctionnant sous radio-contrôle. Enfin, la mise hors service des antennes radio et de télévision pourrait en outre empêcher la diffusion des informations aux citoyens sur les mesures et attitudes à suivre en cas de sinistre.

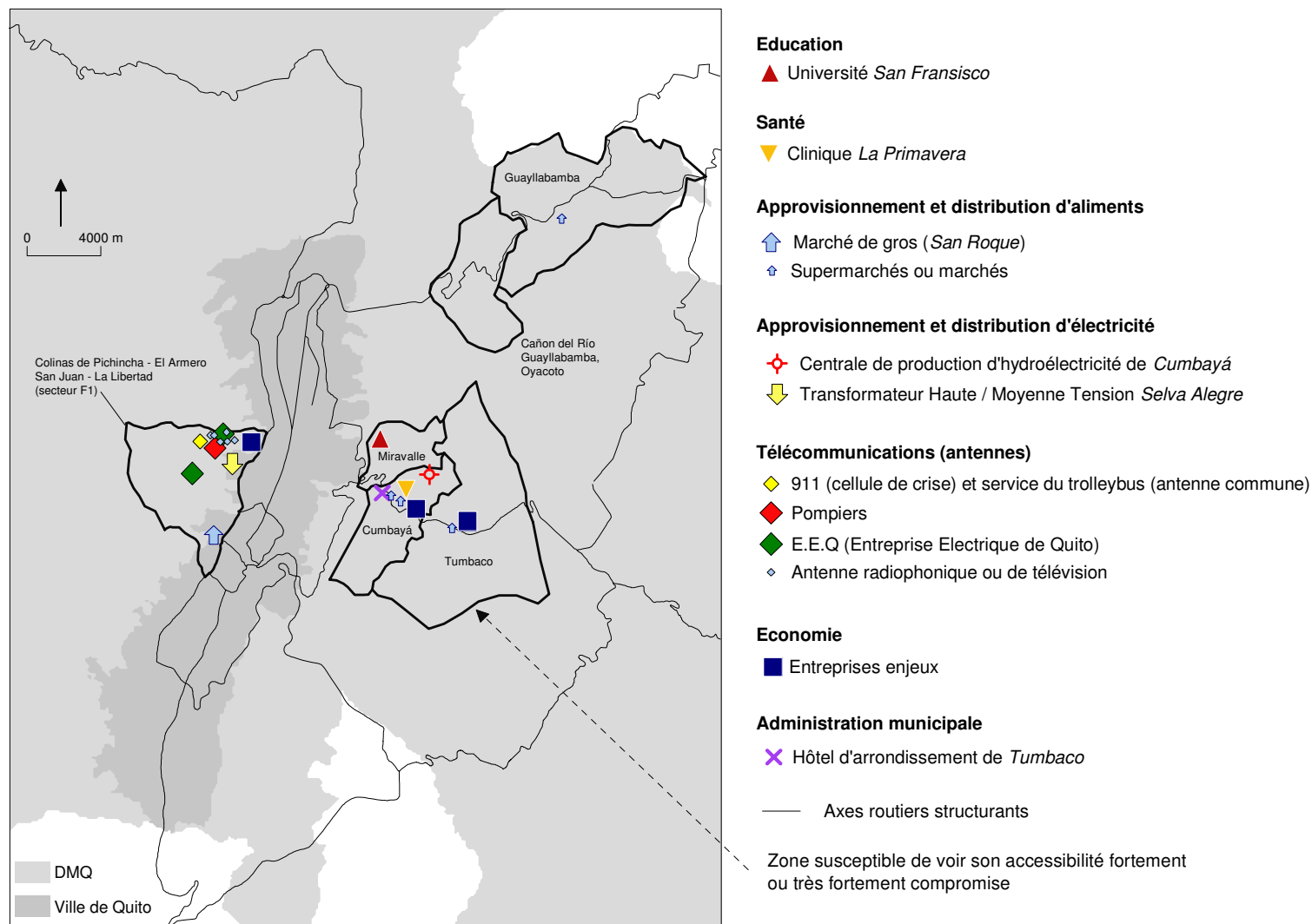
Conclusion

Cet article avait pour objectif de présenter une méthode permettant de mettre en relief certaines dimensions de la vulnérabilité territoriale en ayant comme angle d'approche la vulnérabilité des supports physiques et logistiques des mobilités quotidiennes.

La recherche a démarré par une analyse approfondie de l'organisation et du fonctionnement de la mobilité dans le DMQ. Cette connaissance a permis de discerner les infrastructures-clefs des réseaux routier et de transport, infrastructures dont l'endommagement ou la perte serait en conséquence très préjudiciable pour le district. La vulnérabilité des infrastructures-clefs a été évaluée en considérant six entrées qui renseignent sur leur propension à se retrouver hors service. Cette perte d'opérationnalité implique à son tour une diminution de l'intégrité du réseau. Cette dernière permet de comprendre les problèmes de mobilité qui peuvent survenir sur un territoire, et la vulnérabilité de l'accessibilité de certains secteurs. La réduction de l'accessibilité des secteurs atteste d'une forme de vulnérabilité des populations y résidant et des fonctions urbaines s'y trouvant. Enfin, à partir de là, il est possible d'appréhender, à une échelle supérieure, la vulnérabilité du territoire urbain dans son ensemble, à travers différents scenarii.

Les résultats ainsi obtenus ont permis de proposer un socle de réflexion utile aux différents acteurs urbains et à l'autorité municipale du District Métropolitain de Quito. La base de données géo-référencées actualisée et les cartes élaborées constituent des outils et des supports d'aide à la décision pour la planification préventive et la gestion des risques.

Par exemple, des propositions d'alternatives routières balisées ont été définies pour pallier la fermeture des tunnels, infrastructures hautement vulnérables et essentielles pour relier le Nord et le Sud de la ville. Le renforcement structural des quelques ponts-clefs identifiés parmi les plus vulnérables face au séisme permettrait d'éviter leur effondrement. Lorsque cette solution n'est pas techniquement ou financièrement possible, l'entreposage de matériel de reconstruction à proximité, permettrait de faciliter leur réhabilitation. De même, des investissements ciblés dans le domaine de la voirie permettraient d'améliorer l'accessibilité des quelques secteurs comportant des fonctions urbaines stratégiques les plus exposés à l'isolement. Dans le même ordre d'idée, la relocalisation de certaines installations urbaines stratégiques dans des secteurs ayant moins de risque de se retrouver isolés, ou la déconcentration spatiale des antennes permettraient au district d'affronter plus efficacement une crise. Enfin, il pourrait être prévu de rendre obligatoire la construction de plusieurs voies d'accès pour les nouveaux lotissements.



Carte 7. Localisation de fonctions urbaines stratégiques pour le DMQ dans les zones susceptibles de connaître une forte ou très forte réduction de leur accessibilité. Sources : Mairie de Quito, EEQ, relevés de terrain. Réalisation : F. Demoraes

Références bibliographiques

Appert M., Chapelon L., 2001, "The urban traffic system vulnerability: definition and measures", Communication au 12e colloque international de Géographie théorique et quantitative, St Valéry en Caux, France, septembre 2001.

Appert M., Chapelon L., 2003, "Variabilité de la performance des réseaux routiers: application à la région urbaine de Londres", in: Mathis Ph. (ed.), Graphes et réseaux: modélisation mult niveau, Paris, Hermès.

Berdica K., 2002, "An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done?" Transport Policy 9 (2), 117-127.

CERTU, 2002, "Vulnérabilité des réseaux urbains et gestion de crise : exemple de l'inondation de mars 2001 à Lyon et Mâcon", Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (DPPR), 81p. (<http://www-certu.fr>)

Demoraes F., 2004, Mobilité, enjeux et risques dans le District Métropolitain de Quito, thèse publiée, Université de Savoie (<http://tel.archives-ouvertes.fr/documents/archives0/00/00/70/25/>)

Demoraes F., D'Ercole R., Metzger P., Souris M., 2006, "Enjeux, mobilité, accessibilité et risques - L'exemple du District Métropolitain de Quito (Equateur)", Revue Internationale de Géomatique, Vol. 16/3-4, 435-456.

D'Ercole R., 1998, "Approches de la vulnérabilité et perspectives pour une meilleure logique de réduction des risques", Pangea, No. 29-30, 20-28.

D'Ercole R., Demoraes F., 2003, "Risques et réponses institutionnelles en Equateur - Cartes et méthodes", Cahiers de Géographie, No. 1, Collection EDYTEM, 157-168.

D'Ercole R., Metzger P. 2004, La vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito, Coll. Quito Metropolitano, Quito.

EPN - GeoHazards International - MDMQ - ORSTOM - OYO Corp., 1995, Proyecto para el manejo del riesgo sísmico de Quito, Síntesis, Quito, Coll. Quito Metropolitano.

Gleyze J.-F., 2007, "Reducing functional network vulnerability - Structural indicators to anticipate the structural reorganisation of a damaged transportation network", Actes de la 15e édition de la Conférence Européenne de Géographie Théorique et Quantitative, ECTQG, Montreux, Suisse, 4 p. <http://recherche.ign.fr/labos/cogit>

Leone F., Vinet F., 2006, La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles : Analyses géographiques : Géorisques 1, Coll. GESTER, Montpellier, Publications de l'Université Paul Valéry.

Iida Y., 1999, "Basic concepts and future directions of road network reliability analysis", Journal of Advanced Transportation, Vol. 33, No. 2, 125-134.

Lleras-Echeverri G., Sanchez-Silva M., 2001, "Vulnerability analysis of highway networks, methodology and cases study", Transport 174 (4), 223-230.

Lutoff C., 2000, Le système urbain niçois face à un séisme - Analyse des enjeux et des dysfonctionnements potentiels, thèse de doctorat en géographie, Université de Savoie.

Núñez H., 1997, "El transporte en el Distrito Metropolitano", Documento de Discusión Interna, Municipio de Quito, 20p.

Peltre P., 1989, "Quebradas y riesgos naturales en Quito, período 1900-1988", Estudios de Geografía, Vol. 2, Colegio de Geógrafos del Ecuador, Corporación Editorial Nacional, 45-91.

Taylor M.A.P., D'Este G.M., 2003, "Concepts of network vulnerability and applications to the identification of critical elements of transport infrastructure", 26th Australasian Transport Research Forum, Wellington, New-Zealand, October 2003, 15p.